

# 变压器电气试验关键技术应用研究

马跃虎 闫嘉晖

宁夏送变电工程有限公司 宁夏银川 750001

**摘要:** 变压器作为电力系统的核心设备,其运行状态直接影响电网的安全稳定。电气试验是保障变压器性能与寿命的关键手段,通过科学的试验方法可及时发现设备潜在缺陷。本文聚焦变压器电气试验的关键技术,系统分析绝缘试验、直流电阻试验、变比试验等核心试验类型的原理与应用场景,结合330kV变电站主变试验、风电用干式变压器试验等案例阐述技术实践效果,探讨试验过程中的干扰因素与优化策略,为提升变压器试验准确性与效率提供参考,助力电力系统可靠运行。

**关键词:** 变压器; 电气试验; 绝缘试验; 直流电阻; 试验技术

## 引言

在电力系统中,变压器对电压变换与电能传输至关重要,其运行可靠性关乎电网安全,长期高电压、大电流工况易使其出现绝缘老化等缺陷,2023年全国电力系统故障中18%由变压器缺陷导致,且60%可通过提前电气试验预防;变压器电气试验能检测其电气性能参数、评估健康状态,而随着电力系统向高电压、大容量发展,传统试验方法因操作繁琐、抗干扰能力弱难以满足智能电网运维需求,故研究应用先进电气试验关键技术、建立科学试验体系成为电力设备运维核心任务,本文结合最新实践梳理绝缘等关键技术应用路径,借工程案例验证有效性,为电力行业提供技术借鉴。

## 一、变压器电气试验关键技术体系

### 1. 绝缘试验技术

#### (1) 绝缘电阻与吸收比试验

用2500V兆欧表测变压器绕组对地及绕组间绝缘电阻,评估绝缘整体状况。试验前变压器需充分放电5分钟以上,测量环境温度控制在10~30℃,相对湿度不超75%。吸收比( $R_{60s}/R_{15s}$ )是判断绝缘受潮的关键指标,35kV及以上变压器的吸收比应 $\geq 1.3$ ,若低于该值,

需结合极化指数( $R_{10min}/R_{1min} \geq 1.5$ )综合判断。例如,某220kV变压器试验时吸收比为1.1,经进一步检测发现绕组绝缘纸含水量达3.5%,超标严重,及时更换绝缘材料后避免了击穿风险。

#### (2) 介质损耗角正切值( $\tan \delta$ )试验

借助介损测试仪测量绝缘介质损耗角正切值,以此反映绝缘的老化与受潮程度。试验电压依据设备额定电压确定,110kV及以上变压器施加10kV。对于油纸绝缘变压器,20℃时 $\tan \delta$ 应 $\leq 0.5\%$ ;干式变压器应 $\leq 1.0\%$ 。为消除现场电磁干扰,采用倒相法、移相法等抗干扰接线,将测量误差控制在 $\pm 0.0005$ 以内。在某500kV变电站主变试验中,高压侧 $\tan \delta$ 随温度升高异常增大,20℃时为0.6%,70℃时升至1.8%,解体检查证实是绝缘油劣化,介损值达0.8%,更换新油后指标恢复正常。

#### (3) 交流耐压试验

该试验模拟变压器运行中的过电压工况,考核绝缘耐受能力。试验电压按规程选取,如10kV变压器施加30kV,35kV施加85kV,持续1分钟。采用频率在30~300Hz的串联谐振试验装置,可避免试验电源容量过大。试验前需测量绝缘电阻与 $\tan \delta$ ,合格后方可进行;试验中若出现击穿、闪络或电流急剧增大,应立即降压停机。某110kV变压器耐压试验时,在200kV电压下出现局部放电,量达500pC,经定位检测发现套管内部存在气泡,更换套管后试验合格。

## 2. 直流电阻试验技术

### (1) 绕组直流电阻测量

采用四端法,将电流端与电压端分开,以消除引线电阻影响。针对容量 $\leq 1000kVA$ 的变压器,使用精度0.2级的双臂电桥测量;大容量变压器则用输出电流 $\geq 10A$ 的

## 作者简介:

马跃虎(1981-)男,回族,宁夏银川人,大学本科,高级工程师,主要从事工作:高压电气设备现场电气试验,设备故障分析与处理;

闫嘉晖(1996-)男,汉族,宁夏中宁人,大学本科,助理工程师,主要从事工作:高压电气设备现场电气试验,设备故障分析与处理。

直流电阻测试仪。各相电阻不平衡率，相间应 $\leq 2\%$ ，线间应 $\leq 4\%$ ，且分接开关各挡位电阻需与铭牌一致。测量时记录绕组温度，按公式换算至 $75^{\circ}\text{C}$ （铜绕组）或 $100^{\circ}\text{C}$ （铝绕组）对比。如某 $35\text{kV}$ 变压器试验，A相电阻 $1.25\Omega$ ，B相 $1.28\Omega$ ，C相 $1.52\Omega$ ，不平衡率达 $20\%$ ，解体后发现C相分接开关接触不良，处理后不平衡率降至 $1.5\%$ 。

### （2）分接开关直流电阻试验

针对有载分接开关，需测量各挡位切换时的过渡电阻与时间特性。利用有载分接开关测试仪进行测试，输出电流设为 $5\text{A}$ ，既能确保不损坏设备，又能有效检测内部电气连接；采样频率设为 $10\text{kHz}$ ，可精准捕捉切换时电气参数变化，并记录电阻变化曲线。依规程，过渡电阻偏差 $\leq 10\%$ ，保障调压稳定；切换时间偏差 $\leq 20\text{ms}$ ，确保调压快速不影响系统。例如，某 $220\text{kV}$ 变压器有载开关 $3\rightarrow 4$ 挡测试时，过渡电阻从 $1.5\Omega$ 突增至 $5.2\Omega$ ，超出偏差范围，经现场检查与历史数据比对，判断为触头磨损致接触电阻增大。更换触头后复测，过渡电阻恢复正常，设备运行状态恢复如初。

### 3. 变比与接线组别试验

#### （1）变比测量

采用变比电桥或智能变比测试仪，测量高、低压绕组的电压比。对于三相变压器，需测量各相及线间变比，偏差应 $\leq \pm 0.5\%$ （额定分接）或 $\pm 1\%$ （其他分接）。试验时施加低压侧电压（通常为 $100\text{V}$ ），测量高压侧感应电压，计算变比 $K=U_1/U_2$ 。某 $10\text{kV}$ 配电变压器试验中，测得变比为 $10.5/0.4\text{kV}$ ，实际变比 $10/0.4\text{kV}$ ，偏差 $5\%$ ，查明为出厂绕组分接错误，返工后合格。

#### （2）接线组别校验

通过相位表或变比测试仪判断绕组接线组别（如 $Y_{yn0}$ 、 $D_{yn11}$ ），确保与系统接线一致。测量高压侧与低压侧的相角差，误差应 $\leq 3^{\circ}$ 。某新建变电站变压器试验中，发现接线组别为 $Y_{yn0}$ （设计要求 $D_{yn11}$ ），若投入运行将导致三相电压不平衡，纠正接线后问题解决。

### 4. 局部放电试验

测量变压器局部放电量常用超高频（UHF）法和脉冲电流法，UHF法通过箱体上的UHF传感器捕捉特高频电磁波，抗干扰能力强、频带宽且能快速定位，脉冲电流法测量试品回路脉冲电流，精度高可直观反映放电强度；试验电压按“ $1.3$ 倍额定电压持续 $1\text{min}$ ”施加，依据DL/T 596-2021《电力设备预防性试验规程》以模拟极端工况，不同电压等级变压器放电量要求严格， $500\text{kV} \leq 100\text{pC}$ 、 $220\text{kV} \leq 200\text{pC}$ 、 $110\text{kV}$ 及以下 $\leq 300\text{pC}$ ，超阈值可能存在潜在故障；试验中，双层编

织屏蔽（屏蔽效率超 $95\%$ ）的屏蔽电缆与噪声 $\leq 10\text{pC}$ （多级放大且抑噪）的低噪声放大器协同，可最大程度降低外界干扰以保障测量准确；某风电 $35\text{kV}$ 干式变压器初始检测放电量达 $500\text{pC}$ 超标准，经利用放电超声波信号、多传感器阵列采集分析的超声波定位技术，发现高压绕组匝间绝缘因长期机械振动和电磁应力老化开裂，修复绝缘并重新浸渍后，放电量降至 $50\text{pC}$ 符合标准，规避了故障风险。

### 5. 绕组变形试验

通过频率响应分析法（FRA）检测绕组变形。向绕组注入 $1\text{kHz}\sim 1\text{MHz}$ 扫频信号，测量输入与输出端的传递函数，与原始图谱对比，若共振峰频率偏移 $\geq 2\%$ 或幅值变化 $\geq 3\text{dB}$ ，判定存在变形。试验时需断开所有引线，避免其他设备影响。某 $500\text{kV}$ 变压器遭受短路故障后，FRA图谱显示低压绕组在 $500\text{kHz}$ 处共振峰消失，解体证实为绕组鼓包变形，更换绕组后恢复正常。

## 二、变压器电气试验工程案例

### 1.330kV 变电站主变压器交接试验

某 $330\text{kV}$ 变电站新增1台 $750\text{MVA}$ 主变压器（型号SFZ11-750000/330），交接试验需全面检测设备性能。

关键试验过程：

- 绝缘试验：测量绝缘电阻（高压对低压及地 $2200\text{M}\Omega$ ，低压对高压及地 $1600\text{M}\Omega$ ），吸收比 $1.4$ ，极化指数 $2.5$ ； $\tan \delta$ （ $20^{\circ}\text{C}$ ）高压侧 $0.35\%$ ，低压侧 $0.25\%$ ；交流耐压试验（高压侧施加 $320\text{kV}$ ，持续 $1\text{min}$ ）无击穿。

- 直流电阻：高压侧各分接电阻偏差 $\leq 1\%$ ，低压侧电阻不平衡率 $0.7\%$ 。

- 变比试验：额定分接变比 $345/115\text{kV}$ ，实测偏差 $0.25\%$ ，接线组别 $YNd11$ 正确。

- 局部放电： $1.3$ 倍额定电压下放电量 $\leq 80\text{pC}$ ，符合标准。

- 绕组变形：FRA图谱与出厂数据一致，无明显偏差。

试验结论：各项指标合格，变压器具备投运条件。投运1年后跟踪试验，参数无显著变化，运行稳定。

### 2. 风电场35kV干式变压器预防性试验

某风电场20台 $35\text{kV}$ 干式变压器（容量 $2.5\text{MVA}$ ）运行5年，进行预防性试验评估状态。

重点试验内容：

- 绝缘电阻：高压对低压及地平均 $500\text{M}\Omega$ （标准 $\geq 300\text{M}\Omega$ ），吸收比 $1.4$ 。

- $\tan \delta$ ： $20^{\circ}\text{C}$ 时平均 $0.8\%$ （标准 $\leq 1.0\%$ ），但其中1台达 $1.2\%$ ，怀疑绝缘老化。

- 局部放电： $1.3$ 倍额定电压下，18台放电量

$\leq 200\text{pC}$ , 2台达 $400\text{pC}$ 。

·绕组直流电阻:不平衡率均 $\leq 2\%$ ,分接开关接触良好。

处理措施:对 $\tan \delta$ 超标的变压器进行绝缘清扫,局部放电超标的2台更换高压绕组。整改后试验合格,设备恢复运行。

### 3.110kV变压器短路故障后诊断试验

某110kV变电站变压器遭受外部短路后,进行针对性试验判断损伤程度。

试验发现:

·直流电阻:低压侧电阻不平衡率从 $0.5\%$ 升至 $3.2\%$ 。

·FRA图谱:低压绕组在 $100\sim 200\text{kHz}$ 频段与历史数据偏差显著。

·变比试验:低压侧变比偏差达 $1.2\%$ (标准 $\leq 0.5\%$ )。

解体检査:低压绕组靠近中部位置有3饼线圈变形,分接开关触头烧损。更换受损部件后,各项试验指标恢复正常,变压器重新投运。

## 三、试验过程中的干扰因素与优化策略

### 1.主要干扰因素分析

#### (1)电磁干扰

现场附近运行设备(如母线、电抗器)产生的交变电磁场,会导致 $\tan \delta$ 测量误差增大(可达 $0.001$ ),局部放电试验中引入虚假信号( $\geq 50\text{pC}$ )。某 $220\text{kV}$ 变电站试验中,因邻近母线带电运行, $\tan \delta$ 测量值比实际值高 $0.2\%$ 。

#### (2)环境因素

湿度 $> 80\%$ 时,绝缘电阻测量值下降 $30\%\sim 50\%$ ;温度变化 $10^\circ\text{C}$ ,直流电阻偏差可达 $5\%$ 。某多雨季节进行的 $10\text{kV}$ 变压器试验,绝缘电阻初测值 $200\text{M}\Omega$ (湿度 $85\%$ ),干燥后复测达 $500\text{M}\Omega$ 。

#### (3)试验设备误差

兆欧表、变比仪等仪器精度不足(如 $0.5$ 级以下),或电缆接触不良,会导致数据偏差。某试验中因测试线接触电阻过大,直流电阻测量值偏高 $15\%$ 。

#### (4)操作规范性

试验前未充分放电( $< 3\text{min}$ ),会导致绝缘电阻测量值偏低;耐压试验升压速度过快( $> 1\text{kV/s}$ ),可能引发绝缘损伤。

### 2.技术优化策略

#### (1)抗电磁干扰措施

·采用屏蔽线连接试验仪器,屏蔽层单端接地(接地电阻 $\leq 4\Omega$ );

· $\tan \delta$ 试验采用异频电源(如 $45\text{Hz}$ 、 $55\text{Hz}$ ),避开

$50\text{Hz}$ 工频干扰;

·局部放电试验时,将设备外壳与接地网可靠连接,设置临时屏蔽围栏。

#### (2)环境控制方法

·湿度 $> 80\%$ 时,采用除湿机将环境湿度降至 $70\%$ 以下;

·测量直流电阻、 $\tan \delta$ 时记录环境温度,按标准公式换算至参考温度(如 $75^\circ\text{C}$ );

·大风天气(风速 $> 5\text{m/s}$ )暂停户外试验,避免灰尘附着影响绝缘测试。

#### (3)设备与操作优化

·选用 $0.2$ 级及以上精度的试验仪器,定期送检(每年1次);

·测试线采用 $4\text{mm}^2$ 多股铜缆,接头涂抹导电膏,确保接触电阻 $< 0.01\Omega$ ;

·制定标准化操作流程:绝缘试验前放电 $\geq 5\text{min}$ ,耐压试验升压速度控制在 $0.5\sim 1\text{kV/s}$ ,试验后放电时间为充电时间的2倍。

## 结论

变压器电气试验是设备安全运行关键,核心技术各有侧重:绝缘试验定位绝缘隐患,直流电阻试验查绕组、分接开关问题,变比试验识档位、匝数异常,三者构成故障诊断核心。

实际应用中, $330\text{kV}$ 变电站主变交接试验用变频串联谐振耐压装置,风电场干式变压器预防性试验靠局部放电在线监测,循规程并采取抗干扰措施,试验误差可控制在 $\pm 0.5\%$ 内。

当前面临特高压强电磁环境、高海拔高温度的挑战,未来需推广智能与AI设备、深化抗干扰技术、建标准化规范,推动试验智能化、精准化,为新型电力系统供保障。

## 参考文献

- [1]李建明,朱康.电气设备预防性试验技术[M].北京:中国电力出版社,2020.
- [2]DL/T 596-2021.电力设备预防性试验规程[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [3]张仁豫,陈昌渔.高电压试验技术[M].北京:清华大学出版社,2018.
- [4]赵智大.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2019.
- [5]王绍武.变压器试验技术问答[M].北京:机械工业出版社,2020.